第 37 卷第 6 期 生 态 学 报 Vol.37,No.6
2017 年 3 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Mar.,2017

DOI: 10.5846/stxb201509301992
曹福明,闫文德,田大伦,邓湘雯,陈建华.桃江县毛竹林生态系统碳储量及其空间分布.生态学报,2017,37(6):2005-2013.
Cao F M, Yan W D, Tian D L, Deng X W, Chen J H.Distribution of biomass and carbon storage in different aged stands of Moso Bamboo plantations in Taojiang, Hunan.Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):2005-2013.

桃江县毛竹林生态系统碳储量及其空间分布

曹福明[1,2],闫文德[1,2,3,*],田大伦[1,2,3],邓湘雯[1,2,3],陈建华[1]

1 中南林业科技大学,长沙 410004
2 南方林业生态应用技术国家工程实验室,长沙 410004
3 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站,怀化 418307

摘要:采用标准地调查和生物量实测方法,研究了湖南省桃江县毛竹林生态系统生物量、碳含量、碳储量及空间分布格局。结果表明,不同年龄毛竹林生态系统总生物量分别为:28.147、30.889 t/hm^{2}和 57.763 t/hm^2,其中竹林层生物量为 20.254、25.036、55.685 t/hm^2,各器官生物量均以竹竿最高,占器官生物量的 63.0%以上。不同年龄毛竹各器官碳平均含量为 0.466—0.483 gC/g;灌木层碳含量为 0.474—0.489 gC/g;草本层为 0.472—0.490 gC/g;死地被物层为 0.213—0.276 gC/g;土壤层有机碳含量为 14.790—34.503 gC/g。各年龄毛竹林生态系统总碳储量分别为 131.273、139.089 t/hm^{2}和 167.817 t/hm^2,其中植被层碳储量为 13.627—28.419 t/hm^2,占系统总碳储量的 9.935%—16.935%;死地被物为 0.307—0.420 t/hm^2,占 0.234%—0.265%;土壤层为 117.339—138.978 t/hm^2,占 82.815%—89.799%。毛竹林生态系统碳储量分布格局为:土壤层>植被层>死地被物层。研究结果可为深入研究毛竹林的碳平衡提供基础数据。

关键词:毛竹林;生物量;碳含量;碳储量;桃江县

Distribution of biomass and carbon storage in different aged stands of Moso Bamboo plantations in Taojiang, Hunan

CAO Fuming[1,2], YAN Wende[1,2,3,*], TIAN Dalun[1,2,3], DENG Xiangwen[1,2,3], CHEN Jianhua[1]

1 *Central South University of Forestry and Technology*, *Changsha* 410004, *China*
2 *National Engineering Lab for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China*, *Changsha* 410004, *China*
3 *National Key Station for Field Scientific observation & Experiment*, *Huaihua* 418307, *China*

Abstract: In this study, the biomass and carbon concentrations were measured and the carbon storages were estimated in various plant organs and components of different aged stands of Moso bamboo plantations in Taojiang county, Hunan province. The objective of the research project was to quantify the special distribution of biomass and carbon storage in bamboo forest ecosystems in order to better understanding of the dynamic property of biomass production and carbon cycle in the plantation ecosystems. The results showed that (1) the standing biomass increased with aged plantations. The standing biomass was 28.15, 30.89, and 57.76 t/hm^2 in three studied aged stands, respectively, of which the stem organ accounted for the highest proportion of the total standing biomass for all aged stands, with an average value of 63%; (2) the carbon storage increased with aged stands, ranging from 131.27 t/hm^2 to 167.82 t/hm^2 in the three different aged Moso bamboo plantations. The carbon concentrations in plant organs varied with tree aging and ranged from 0.466 gC/g to 0.483 gC/g. The range of carbon concentrations was 0.474—0.489 gC/g in the shrub layer, 0.472—0.490 gC/g in the herbaceous layer,

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201104009); 湖南省高校创新平台建设项目(湘财教字[2010]70 号);长沙市科技局能源研发平台建设项目(K1003009-61)

收稿日期:2015-09-30; **网络出版日期**:2016-08-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: csfuywd@hotmail.com

0.213—0.276 gC/g in the litter layer, and 14.790—34.503 gC/g in soils; (3) the total carbon storage was 131.27, 139.09, and 167.82 t/hm^2 in the three different aged Moso bamboo plantation ecosystems, respectively, of which 13.63—28.42 t/hm^2 was found in the vegetation layer and 0.307-0.420 t/hm^2 in the litter layer, respectively, which accounted for 9.94%—16.94% and 0.23%—0.27% of the total carbon storage in the plantation ecosystems. Carbon storage in soils ranged from 117.34 t/hm^2 to 138.98 t/hm^2, which accounted for 82.82%—89.80% of the total carbon in the ecosystems. The carbon storage in different components declined in an order soil layer>vegetation layer>litter layer in all studied Moso bamboo plantation ecosystems. Our results provide scientific references for further studying of carbon cycle and sequestration in bamboo forests.

Key Words: moso bamboo plantation; biomass; carbon dynamics; carbon storage; Taojiang county

由于人为活动影响,化石燃料的大量使用和土地变化的原因,大气中 CO_2浓度以 1.9 mL m^{-3} a^{-1}的线性速率增加[1-2]。CO_2作为最重要的一种温室气体,其源与汇成为全球关注的热点[3-4]。森林作为重要的陆地生态系统在吸收大气 CO_2、缓解气候变化中的作用已经得到了广泛的共识[5-6]。我国许多科学家为研究森林对全球碳平衡的影响,从全球、区域尺度或国家尺度上研究了森林生态系统的碳分布及碳贮量[7-11]。因此提高森林覆盖率或选择碳积累量较大的林木可有效调节全球碳平衡和维护区域生态环境[7]。然而,为正确评价森林对大气 CO_2的固定能力,较小尺度上研究某个地区、某个林种的碳固定量也显得十分迫切[12-13]。

竹林是一类重要的森林资源,在固碳增汇中起着重要的作用[14-15]。在全球森林面积急剧下降的今天,竹林面积却以 3%的速度在增长,这意味着竹林是一个不断增大的碳汇,为增加森林碳汇寻找到了新的途径[16]。毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)是我国南方重要的森林资源,它占据了全国竹林面积的 71.89%[17]。近年来,有关毛竹林分碳储量研究已取得一些成果[12-13,18-25],这些成果为正确评价毛竹林在固碳效应及应对全球变暖中的作用和地位做出了贡献。但目前对毛竹林碳储量还未引起足够重视,区域数据不足,代表性不强,难以反映全国毛竹林面积 337.20 万 hm^{2}的实际情况[18]。加之毛竹林的林分、不同经营管理措施及地带性差异,使得正确估算毛竹林生态系统碳储量仍存在较大的不确定性,对毛竹林生态系统碳储量的研究结果差异较大[20-23],另外还受竹龄因素的影响和制约,而对不同年龄毛竹林分碳储量及其变化趋势的研究虽有报道[19,23,25],但仍需加强。

湖南省桃江县为中国十大“竹子之乡”,种植着 6.7 万 hm^{2}的毛竹林,深受山区农民的喜爱,竹林产业占到当地农民收入的 30%左右,经济和社会效益十分显著。对毛竹生长和经营方面前人已作过研究,但有关毛竹林固碳能力研究较少,本文则以桃江县桃花江林场的毛竹林生态系统为研究对象,并结合毛竹林中毛竹的年龄,对其生物量、碳含量、碳储量及其空间分布格局进行了研究,可为深入研究我国毛竹林生态系统的碳平衡提供基础数据,为我国竹林碳汇/源研究提供参考。

1 研究区概况

研究地点在桃江县的桃花江林场。桃江县位于湖南省中部偏北(111°36′E—112°19′E、28°13′N—28°41′N)。处于雪峰山余脉向洞庭湖过渡的环湖丘岗地带,海拔范围在 29.7—917.5 m(平均 200 m),属中亚热带大陆性季风湿润气候,年均气温 16.6℃。降水量 1400—2000 mm,土壤为山地红壤且土层浅薄。植被为中亚热带常绿阔叶林带,自然植被主要有山茶科(*Theaceae*)、壳斗科(*Fagaceae*)、樟科(*Tauraceae*)等,还有 6.7 万 hm^{2}毛竹林(*Phyllostachys heterocycla*),被称为中国十大“竹子之乡”。

2 研究方法

2.1 标准地设置和调查方法

桃花江林场以经营毛竹为主。标准地则设置在林场的毛竹人工纯林内。其海拔高度为 200—300 m,坡

向为南坡,坡度在 15°以下,土层厚度约 1 m,土壤为红壤,pH 值 4.4—4.5。新造竹林在定植 3 年内,每年的 5 月和 7 月除草松土,成林的竹林每年于夏季钩梢,冬季挖山。

由于毛竹林是一种异龄林,年龄是林分结构的重要特征,依据管护人员记载的栽植时间,并结合对毛竹年龄的判别方法,分别在 1 年生或 3 年生或 5 年生的毛竹株数占据了 50%—60%以上的竹林中,设置 20 m×33.3 m 标准地各 6 块,共 18 块,分别作为 1 年生或 3 年生或 5 年生的毛竹林,并在各标准地内只调查记录 1 年生或 3 年生或 5 年生的毛竹株数、胸径、树高等因子,而其他年龄毛竹不在调查范围内,故不计入其内,经计算后,在各标准地内选出平均木 1 株,则 1 年生、3 年生和 5 年生标准木各 6 株,共 18 株。各标准地竹林结构特征见表 1。

表 1　标准地竹林特征

Table 1　Characteristics of the sample plots for moso bamboos

年龄 Age/a	株数/(株/hm²)* Density	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	林下主要植物 Forests mainly plant
1	1250(17.33)	11.06(0.87)	10.14(0.32)	野鸭椿(*Euscaphis japonica* (Thunb.) Dippel); 南五味子(*Kadsura longipedunculata* Finetet Gagnep); 鳞毛蕨(Dryopteridaceae spp.)
3	1300(102.60)	9.13(1.06)	9.01(2.50)	楤木(*Aralia chinensis* L); 清风藤(*Sabia japonica* Maxim); 腹水草(*Veronicastrum stenostachyum* (Hemsl.) Yamazaki)
5	2400(450.78)	9.80(0.85)	10.90(0.91)	青灰叶下珠(*Phyllanthus glaucus* Wall.); 鸡血藤(*Kadsura interior*); 狗脊蕨(*Woodwardia japonica* (L.f.) Sm.)

括号内数据为标准差; * 仅为 1 年生或 3 年生或 5 年生毛竹的株数

2.2　生物量测定

采用“分层切割法”测定毛竹地上器官生物量。将标准木以竹竿交界处为界限,以 1 m 为区分段,分层截取竹竿、竹枝、竹叶,称取鲜重,并分别取样 1.0 kg;地下根系采用挖掘法,以标准竹为中心,在其周围 0.5 m×0.5 m范围内的土层挖出所有的竹蔸、竹鞭和鞭根(分侧根和须根)。用水细心漂洗,再用筛子在水中筛后捡出所有根系,风干表面水后,称取鲜重,各取样 1.0 kg。

在标准地内选择同龄毛竹相对集中的地方,布设灌木层样方(2 m×2 m)、草本层样方(1 m×1 m)、死地被物层样方(1 m×1 m)各 3 个,共取样方 162 个。记录样方内灌木和草本植物种类后,均采用“样方收获法”测定生物量。灌木植物和草本植物按地上器官和地下根系分别称取鲜重,并各取样 1.0 kg。死地被物层分为未分解、半分解、已分解层分别称鲜重,各取样 1.0 kg。

将所有样品带回实验室,置于 80℃下烘箱,烘至恒重,求出含水率,推算生物量。

2.3　土壤样品采集

在各标准地内,与挖取标准竹的同时,在标准竹周围布设 3 个采样点,按 0—20、20—40、40—60 cm 土层,分别采取土样 500 g,共采土样 162 个。去除石砾和根系等杂物,风干后过 20 目和 100 目筛,备用。在采集土样之前,用 100 cm^3环刀取各层原状土,置于 105℃烘至恒重,测定土壤容重。并在距竹林地 500 m 处的空旷地设置对照样地 2 块,面积均为 20 m×33.3 m,与竹林地同时采集土样。作为毛竹林土壤性质和有机碳含量的对比。

2.4　植物和土壤样品测定

土壤容重采用环刀法测定;土壤自然含水率采用烘干法;土壤 pH 值用 SJ—4A 型 pH 计测定;土壤和植物有机碳含量用重铬酸钾氧化外加热法测定。土壤性质见表 2。

2.5　数据处理与计算

数据采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件处理。

数据显著性检验采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD),对不同年龄毛竹单株和林分生物量及碳储量进行了比较,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$。

表 2 标准地毛竹林土壤性质

Table 2 Soil character in different aged moso bamboo plantations

林分 Stand age/a	容重 Density/(g/cm^3)	自然含水量 Natural moisture content/%	pH	有机质 Organic matter/(g/kg)
1 年生毛竹林土 Soil for 1-year plantation	1.16A (0.03)	48.97B (2.27)	4.41A (0.08)	38.96AB (7.39)
3 年生毛竹林土 Soil for 3-year plantation	1.12A (0.04)	68.55c (1.74)	4.45A (0.07)	43.24B (17.04)
5 年生毛竹林土 Soil for 5-year plantation	1.15A (0.01)	65.91C (3.21)	4.54A (0.08)	46.51B (1.08)
对照 CK	1.21A (0.05)	36.85A (3.22)	4.51A (0.07)	32.05A (9.48)

括号内数据为标准误差。同列相同小写字母表示同一林地土层间差异不显著(P>0.05);同列相同大写字母表示不同林分间差异不显著(P>0.05)

2.5.1 林分生物量计算

林分乔木层生物量(t/hm^2)= 毛竹单株生物量(6 株标准竹生物量的平均值)×林分中的株数(仅为 1 年生或 3 年生或 5 年生毛竹的株数)

灌木层生物量(t/hm^2)= 所有灌木植物地上部分生物量+地下部分生物量;

草本层生物量(t/hm^2)= 所有草本植物地上部分生物量+地下部分生物量;

死地被物层生物量(t/hm^2)= 未分解层生物量+半分解层生物量+已分解层生物量。

2.5.2 林分碳储量计算

乔木层各器官碳储量(t/hm^2)= 各器官生物量×各器官碳含量;

林分乔木层碳储量(t/hm^2)= 乔木层林木各器官碳储量之和;

灌木层碳储量(t/hm^2)= 各灌木植物碳储量的加权平均值;

草本层碳储量(t/hm^2)= 各草本植物碳储量的加权平均值;

土壤层碳储量(t/hm^2)= 土壤容重(g/cm^3)×土层深度(cm)×土壤有机碳含量(g/kg);

林分乔木层碳年固定量(t/hm^2)= 林分碳储量÷6[12]

3 结果与分析

3.1 生物量

3.1.1 不同年龄毛竹生物量

表 3 列出了不同年龄毛竹各器官生物量。可以看出,毛竹单株生物量为 16.204—23.202 kg,林分生物量为 20.254—55.685 t/hm^2,呈现出随年龄的增加单株及林分生物量均随之而增加的趋势。且地上部分生物量高于地下部分,竹竿生物量远高于其他器官,可占据总生物量的 63.0%以上。

3.1.2 植被层和死地被物层生物量

从表 4 可以看出,毛竹林植被层和死地被物层总生物量在 28.147—57.763 t/hm^{2}之间,并随年龄增加呈逐渐增加的趋势。其中,竹林层生物量占总生物量的 70%以上,且随着年龄的增加,其比重也不断上升;林下植被层中,1 年生和 3 年生竹林均以草本植物为主,5 年生竹林则以灌木为主。且随着林分年龄的增长,灌木层和草本层生物量占总生物量的比例逐渐减小;死地被物层生物量在 1.371—1.731 t/hm^{2}之间,占总生物量的 3%—5%,但其生物量占总生物量的比例却呈波动下降趋势。

3.2 碳含量

3.2.1 毛竹各器官碳素含量

由表 5 表明,毛竹各器官碳素平均含量为 0.466—0.483 gC/g,其中 1 年生毛竹各器官碳素含量变化范围为:0.389—0.534 gC/g,3 年生为:0.398—0.519 gC/g,5 年生为:0.405—0.527 gC/g。1 年生毛竹竹竿碳素含量

最高,须根最低,3 年生和 5 年生毛竹分别以竹枝和竹叶含量最高,侧根最低,但不同年龄的毛竹各器官碳素含量之间均没有明显变化规律。

表 3　不同年龄毛竹各器官生物量

Table 3　Stand biomass of organs for different aged bamboos

生物量 Biomass	年龄 Age/a	竹竿 Stem	竹叶 Leaf	竹枝 Branch	须根 Fibril root	侧根 Lateral root	竹鞭 Rhizomes	竹蔸 Stump	合计 Total
单株生物量 Individual biomass /kg	1	10.675 (3.277)	1.185 (0.349)	2.370 (0.844)	0.097 (0.058)	0.254 (0.194)	0.789 (0.299)	0.834 (0.292)	16.204A (5.171)
	3	13.228 (4.452)	1.171 (0.634)	2.646 (0.659)	0.334 (0.064)	0.458 (0.129)	0.462 (0.199)	0.959 (0.247)	19.258A (4.740)
	5	14.703 (1.984)	1.631 (1.369)	3.059 (1.509)	0.450 (0.238)	0.687 (0.250)	1.332 (0.496)	1.339 (0.359)	23.202B (4.003)
林分生物量 Stand biomass /(t/hm^2)	1	13.343a (4.096)	1.481b (0.436)	2.963b (1.055)	0.121cd (0.073)	0.317d (0.243)	0.986bd (0.374)	1.043bd (0.366)	20.254A (6.463)
	3	17.197a (5.788)	1.522bc (0.825)	3.440b (0.856)	0.435c (0.083)	0.594c (0.168)	0.601c (0.259)	1.247c (0.321)	25.036A (6.163)
	5	35.287a (4.762)	3.915b (3.285)	7.342c (3.622)	1.080d (0.572)	1.649d (0.600)	3.198b (1.191)	3.214b (0.861)	55.685B (9.608)

括号内数据为标准差; 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05); 同列相同大写字母表示差异不显著(P>0.05)

表 4　竹林植被层和死地被物层生物量及分配

Table 4　Biomass and its distribution ratio in bamboo vegetation layer

层次 Layer		1 年生 One year	3 年生 Three years	5 年生 Five years
竹林层 Bamboo layer/ (t/hm^2)		20.254±6.463(71.958)	25.036±6.163(81.052)	55.685±9.608(96.403)
灌木层 Shrub layer/ (t/hm^2)		2..831±0.342(10.058)	2.037±0.084(6.595)	0.278±0.020(0.481)
草本层 Herb layer/ (t/hm^2)		3.691±0.176(13.113)	2.288±0.143(7.407)	0.069±0.006(0.119)
死地被物层 Litter layer	未分解 Un-decomposed/ (t/hm^2)	0.662±0.058	0.751±0.033	0.822±0.080
	半分解 Semi-decomposed/ (t/hm^2)	0.398±0.038	0.488±0.019	0.527±0.060
	已分解 Decomposed/ (t/hm^2)	0.311±0.044	0.350±0.014	0.382±0.019
小计 Sum/ (t/hm^2)		1.371±0.183(4.871)	1.588±0.204(5.141)	1.731±0.224(2.997)
合计 Total/ (t/hm^2)		28.147	30.889	57.763

表中数据为平均值±标准差;括号内数据为百分数

表 5　不同年龄毛竹各器官碳素含量

Table 5　Carbon contents of different organs in different aged bamboos

年龄 Age/a	竹竿/(gC/g) Stem	竹枝/(gC/g) Branch	竹叶/(gC/g) Leaf	须根/(gC/g) Fibril root	侧根/(gC/g) Lateral root	竹鞭/(gC/g) Rhizomes	竹蔸/(gC/g) Stump	平均值/(gC/g) Average
1	0.534 (0.067)	0.465 (0.049)	0.527 (0.032)	0.389 (0.094)	0.481 (0.019)	0.529 (0.026)	0.406 (0.123)	0.476 (0.060)
3	0.471 (0.048)	0.519 (0.104)	0.468 (0.150)	0.451 (0.068)	0.398 (0.057)	0.500 (0.073)	0.452 (0.054)	0.466 (0.039)
5	0.512 (0.031)	0.499 (0.061)	0.527 (0.050)	0.506 (0.043)	0.405 (0.045)	0.466 (0.057)	0.467 (0.044)	0.483 (0.041)

括号内数据为标准差

3.2.2　毛竹林下植被层和死地被物层碳含量

由表 6 可知,灌木层碳含量为 0.474—0.489 gC/g,草本层为 0.472—0.490 gC/g 之间,随年龄变化均有小幅增加,但碳素含量间亦不存在明显变化规律。死地被物层中,各年龄不同分解阶段的碳素含量在 0.2 gC/g 左右,其中 1 年生竹林死地被物层碳素含量随分解时间增加而逐渐减少,3 年生和 5 年生则相反。

表 6 不同年龄毛竹林下植被层和死地被物层碳含量

Table 6 Carbon content of underscore and litter layer in different aged bamboos

年龄 Age/a	灌木层/(gC/g) Shrub layer	草本层/(gC/g) Herb layer	死地被物层 Litter layer/(gC/g)		
			未分解 Unrecompensed	半分解 Semi-decomposed	已分解 Decomposed
1	0.474(0.039)	0.472(0.037)	0.231(0.004)	0.222(0.007)	0.213(0.007)
3	0.484(0.036)	0.481(0.034)	0.233(0.009)	0.223(0.007)	0.246(0.008)
5	0.489(0.031)	0.490(0.032)	0.228(0.016)	0.276(0.021)	0.260(0.021)

括号内数据位标准差

3.3 土壤层有机碳含量

从表 7 可以看出,毛竹林地土壤有机碳平均含量在 22.597—26.980 g C/kg 之间,显著高于对照地(18.592 g C/kg)($P<0.05$),并随林分年龄增加而呈现增加的趋势,而且还随着土壤深度的增加,土壤有机碳含量逐渐减少,除 5 年生竹林地土壤外,1 年生和 3 年生毛竹林土壤表层与深层有机碳含量均存在显著差异($P<0.05$)。

表 7 不同年龄毛竹林土壤碳含量

Table 7 Soil carbon content in different aged bamboos (gC/g)

林龄 Age/a	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	均值 Average
对照 CK	22.950aA±6.058	20.410abA±6.696	12.417bA±1.078	18.592A±5.497
1	26.663aA±1.015	23.010aA±1.401	18.117bC±2.712	22.597AB±4.288
3	34.503aB±2.053	25.943bA±0.820	14.790cAC±1.785	25.079B±9.885
5	27.700aA±2.221	26.633aA±3.322	26.607aB±4.282	26.980B±0.624

表中数值为平均值±标准差;同行相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$);同列不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)

3.4 毛竹林生态系统碳储量及空间分布

3.4.1 毛竹林碳储量

由表 8 可以看出,1 年生、3 年生和 5 年生竹林碳储量分别为 10.490、11.802、28.226 t/hm^2,随年龄增长而不断增加,其中 5 年生毛竹林碳储量与 1 年生和 3 年生毛竹林碳储量间均存在显著差异($P<0.05$)。各毛竹林器官碳储量均以竹竿最高,占毛竹林总碳储量的 60%以上,这与竹竿生物量而紧密相关。

从表 8 还可以看出,1 年生和 5 年生毛竹林中,各器官碳储量高低排序均为:竹竿>竹枝>竹叶>竹鞭>竹蔸>侧根>须根;而 3 年生毛竹林各器官碳储量高低排序为:竹竿>竹枝>竹叶>竹蔸>侧根>竹鞭>须根。

表 8 不同年龄毛竹林各器官碳储量

Table 8 Carbon storage in different organs of different aged bamboos

年龄 Age/a	竹竿/(t/hm^2) Stem	竹枝/(t/hm^2) Branch	竹叶/(t/hm^2) Leaf	须根/(t/hm^2) Fibril root	侧根/(t/hm^2) Lateral root	竹鞭/(t/hm^2) Rhizomes	竹蔸/(t/hm^2) Stump	合计/(t/hm^2) Total
1	7.126aA (2.187)	1.563bA (0.566)	0.689cA (0.203)	0.047dA (0.028)	0.168dA (0.129)	0.475cA (0.180)	0.423cA (0.148)	10.490A (3.348)
3	8.097aA (2.725)	1.609bA (0.401)	0.790cAB (0.428)	0.173dB (0.033)	0.297dA (0.084)	0.271dB (0.117)	0.564cA (0.145)	11.802A (2.848)
5	18.080aB (2.440)	3.866bB (1.907)	1.954cB (1.640)	0.437dA (0.232)	0.768dB (0.279)	1.619cC (0.603)	1.502cB (0.402)	28.226B (4.880)

括号内数据位标准差; 同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 同列相同大写字母表示差异不显著($P>0.05$)

3.4.2 毛竹林生态系统碳储量及空间分布

毛竹林生态系统中碳库主要分为 3 个部分:植被层、死地被物层和土壤层。不同年龄毛竹林生态系统总碳储量分别为 131.273、139.089、167.817 t/hm^2(表 9),并随年龄增加而增加。其中,土壤层碳储量分别为 117.339、124.901、138.978,占总碳储量的 82.815%—89.799%;植被层碳储量在 13.627—28.419 t/hm^{2}之间,占系统总碳储量的 9.935%—16.935%。其中,竹林层碳储量为 10.490—28.226 t/hm^2,占植被层碳储量的 76%以

上;死地被物层碳储量在 0.307—0.420 t/hm^{2}之间,只占系统总碳储量的 0.234%—0.265%,但它是土壤碳库的重要来源,在土壤有机碳的积累和系统碳循环中起着十分重要的作用。毛竹林生态系统碳储量的分布格局为:土壤层>植被层>死地被物层。

由方差分析结果可知,1 年生和 3 年生竹林生态系统总碳储量间无显著差异(P>0.05),但均显著低于 5 年生竹林(P<0.05);1 年生和 3 年生竹林中,灌木层碳储量要低于草本层,5 年生竹林则相反,但其碳储量间差异不显著(P>0.05)。各毛竹林生态系统中死地被物层碳储量显著低于植被层和土壤层(P<0.05)。

表 9　不同年龄毛竹林生态系统碳储量及空间分布(t/hm^2)

Table 9　Carbon storage and distribution in different layer of different aged bamboos

年龄 Age/a	竹林层 Bamboo layer	灌木层 Shrub layer	草本层 Herb layer	死地被物层 Litter layer				土壤层 Soil layer /cm				合计 Total
				未分解 Under-composed	半分解 Semi-decomposed	已分解 De-composed	小计 Sum	0—15	15—30	30—45	小计 Sum	
1	10.490a (3.348)	1.401b (0.167)	1.736b (0.179)	0.153 (0.011)	0.088 (0.007)	0.066 (0.007)	0.307c (0.045)	45.688 (2.900)	37.775 (2.559)	33.876 (5.194)	117.339d (6.019)	131.273A (51.081)
3	11.802a (2.848)	0.956b (0.039)	1.061b (0.066)	0.175 (0.009)	0.109 (0.003)	0.086 (0.005)	0.369c (0.046)	57.801 (1.480)	40.899 (1.799)	26.201 (3.920)	124.901d (15.813)	139.089A (54.481)
5	28.226a (4.880)	0.161b (0.014)	0.032b (0.003)	0.178 (0.024)	0.145 (0.017)	0.097 (0.013)	0.420c (0.041)	41.651 (2.896)	46.684 (3.556)	50.643 (9.014)	138.978d (4.507)	167.817B (60.165)

括号内数据为标准差;同行不同小写字母表示相同林龄不同层次碳贮量差异显著(P<0.05);同列相同大写字母表示不同林龄碳贮量差异不显著(P>0.05)

3.4.3　毛竹林碳素年固定量的推算

从表 9 中可以看出,桃江县桃花江林场 3 个年龄毛竹林生态系统总碳储量为 131.273、139.089、167.817 t/hm^2,明显小于广西大青山 13 年生杉木林的 187.51 t/hm^2[26],山西 38 年生油松人工林的 172.95 t/hm^2[27],而大于湖南会同速生阶段杉木林的 127.88 t/hm^2[28]。毛竹林乔木层的碳储量只有 10.490、11.802、28.220 t/hm^2,远小于上述各林种。依据周国模等[12]推算毛竹林碳年固定量的方法,得出本次研究的毛竹林乔木层碳年固定量为 1.748 t/hm^2(1 年生毛竹林)、1.967 t/hm^2(3 年生毛竹林)、4.704 t/hm^2(5 年生毛竹林)。1 年生和 3 年生毛竹林碳年固定量小于上述各林种,但 5 年生毛竹林碳年固定量却高于广西大青山 13 年生杉木林(3.30 t/hm^2)[26]1.4 倍,高于湖南会同速生阶段杉木林(3.525 t/hm^2)[28]的 1.3 倍,而与山西 38 年生油松林碳年固定量 4.53 t/hm^2[27]接近。表明毛竹林是一个固碳能力较强的林种,且固碳能力随着林龄的增长而增强。因此,适度发展毛竹林对生态环境的保护是有益的。

4　讨论

4.1　毛竹生物量的测定

竹林的特殊结构与生长习性,决定了林分生物量的测算存在一定的难度。毛竹是异龄林,毛竹林分中生长着不同年龄的立竹。本研究在测定毛竹生物量时,为了工作方便和测定准确,而又不影响立竹生长的生态环境,所以在研究区设置的竹林标准地内,仅对占据了 50%—60%以上的同一年龄(1 年生或 3 年生或 5 年生)立竹的株数、胸径、竹高等因子进行了调查、记录和计算,并选出标准木测定生物量,而对其他年龄的立竹,不列入调查测定范围内。这与刘应芳等[19]、漆良华等[23]、张蕊等[25]的前人研究在一块标准地内测定不同年龄毛竹生物量的方法是不相同的。

桃江县毛竹单株生物量为 16.204—23.202 kg,高于刘应芳等[19]蜀南风景区毛竹单株生物量 0.63—1.32 kg,且在庄舜尧等[24]福建建瓯市毛竹单株生物量 8.2—35.4 kg 范围内。郝庆云等[29]天目山毛竹单株生物量平均为 15.375 kg,并认为竹类的个体生物量一般差异不大,毛竹个体的总生物量一般在 13.0—20.0 kg,立竹生物量的大小主要取决于种群密度。

本文研究所得 1 年生、3 年生和 5 年生毛竹林生物量分别为 20.254、25.036、55.685 t/hm^2。均高于蜀南竹海风景区同龄级毛竹林分生物量(14.89、10.49、12.76 t/hm^2)[19]和四川长宁同龄级毛竹林分生物量(14.47、

17.76、11.44 t/hm^2)[25]。这可能与各研究区的气候条件、种群密度、经营方式等有关。桃江县毛竹林各器官生物量均以竹竿最高,占总生物量的63.0%以上,这与天目山毛竹林竹竿占总生物量的62.87%一致[29]。

从毛竹林分地下部分生物量与地上部分生物量比值来看,各研究结果差异较大。浙江临安为0.606[12]、湖南会同为0.649[13]、蜀南竹海风景区为0.480[19]、四川长宁为0.525[25]、福建永春为0.384[30]、天目山为0.331[29]、福建武夷山为0.560[31]、江西大岗山为0.387[32],本研究仅为0.196,明显小于上述研究区。毛竹为散生竹,林分内不同龄级的立竹共有地下的鞭根系统庞大,因此无法准确区分立竹对应的地下鞭根量[25]。目前测定立竹鞭根的处理方法有:1)以立竹为中心,在其周围一定范围内的土层挖掘该立竹的鞭根量[25,30];2)采用典型样方挖掘法[32-33];3)运用生物量模型估算[31,34]。因此测定方法各不相同,使得结果存在差异。本研究是采用方法(1),与张蕊等[25]、彭在清等[30]一致,只是挖掘的范围大小有所不同。此外,彭在清等[30]认为是由于毛竹林中各度竹数量和比例不同及人工经营程度不同所致。何东进等[31]发现人工经营的毛竹林比天然毛竹林有更高的地上部分生物量比例和较低的地下部分生物量比例。因此,经营方式能影响毛竹林生物量的分配格局[33]。本研究区毛竹林的经营管理方式为:定植3年的毛竹林,每年除草松土2次,成林每年一次的挖山,人为干扰也可能是造成毛竹林地下部分生物量比例低的主要原因之一。

4.2 毛竹碳储量

森林生态系统中各组分含碳率是估算森林碳储量的关键因子。以往研究毛竹各器官含碳率表明,浙江临安为0.468—0.521 gC/g[12]、湖南会同0.465—0.472 gC/g[13]、江西大岗山0.463—0.491 gC/g[18]、蜀南竹海风景区0.451—0.531 gC/g[19]、四川长宁0.467—0.479 gC/g[25]。本研究测得毛竹各器官含碳率为0.466—0.483 gC/g,与各研究结果相接近,但还是存在一定差异。另外,四川宜宾苦竹各器官含碳率为0.436—0.463 gC/g[35]、浙江平阳吊丝竹为0.468—0.509 gC/g[36]、四川洪雅麻竹为0.454—0.530 gC/g[37]、四川纳溪孝顺竹为0.489—0.522 gC/g[38]、华西雨屏杂交竹0.472—0.513 gC/g[39]。而且各研究中的竹子各器官含碳率大小顺序也不尽相同。上述表明,竹子含碳率随竹种和器官不同而有差别,就是同一竹种,但不同区域也不相同。因此,必须分区域分竹种对含碳率进行实测,才能保证科学准确地计量竹林的碳汇。

刘应芳等[19]对不同龄级毛竹林分碳储量研究表明,Ⅰ龄级(1—2年生)毛竹林分碳储量为7.55 t/hm^2、Ⅱ龄级(3—4年生)为5.32 t/hm^2、Ⅲ龄级(5—6年生)为6.47 t/hm^2,且随龄级的增长呈波动性下降趋势,均低于本研究的1年生、3年生、5年生毛竹林分碳储量(10.490、11.802、28.226 t/hm^2、),且随年龄的增长而不断增加。但本研究结果却低于霍山(30.4 t/hm^2)和临安(30.2 t/hm^2)毛竹林分碳储量[20],更远低于我国森林植被平均碳储量(57.07t/hm^2)[8]。表明地带性差异是影响森林碳储量的重要因素。

5 结论

(1)桃江县毛竹林分总生物量1年生为28.147 t/hm^2、3年生为30.889 t/hm^2、5年生为57.763 t/hm^2;其中竹林层1年生为20.254 t/hm^2、3年生为25.036 t/hm^2、5年生为55.685 t/hm^2;林下植被层分别为6.522、4.325、0.347t/hm^2,且1年生和3年生以草本层生物量为主,5年生以灌木层生物量为主;死地被物层分别为1.371、1.588、1.731t/hm^2,且随林分年龄的增长而逐渐增加。

(2)桃江县毛竹各器官碳素平均含量为0.466—0.483 gC/g;林下灌木层碳含量为0.474—0.489 gC/g;草本层为0.472—0.490 gC/g;死地被物层为0.213—0.276 gC/g;土壤有机碳平均含量为22.597—26.980 gC/g。不同年龄毛竹林生态系统碳储量分别为131.273、139.089、167.817 t/hm^2,随年龄的增长而增加,其中植被层碳储量分别为13.627、13.819、28.419 t/hm^2,占系统总碳储量的9.935%—16.935%。死地被物层分别为0.307、0.369、0.420 t/hm^2,占0.234%—0.265%。土壤层有机碳储量分别为117.339、124.901、138.978 t/hm^2,占82.815%—89.799%,且碳储量主要集中在表土层(0—30 cm)。生态系统碳储量分布格局为土壤层>植被层>死地被物层

(3)桃江县毛竹林生态系统竹林层碳年固定量1年生为1.748 t/hm^2、3年生1.967 t/hm^2、5年生

4.704 t/hm^2。随着竹龄的增长,碳年固定量增加,止 5 年生时,其碳年固定量为广西大青山 13 年生杉木林(3.30 t/hm^2)[26]的 1.4 倍,是湖南会同杉木林速生阶段(3.525 t/hm^2)[28]的 1.3 倍,而与山西 38 年生油松林碳年固定量 4.53 t/hm^2[27]接近。表明毛竹林是一个固碳能力较强的林种,且固碳能力随着竹龄的增长而增强。因此,适度发展毛竹林对当地及适生区生态环境的保护是有利的。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis in contribution of working group I to the 3rd assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 948-958.
[2] Artuso F, Chamard P, Piacentino S, Sferlazzo D M, De Silvestri L, Di Sarra A, Meloni D, Monteleone F. Influence of transport and trends in atmospheric CO_2 at Lampedusa. Atmospheric Environment, 2009, 43(19): 3044-3051.
[3] Norby R J, Luo Y Q. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multifactor world. New Phytologist, 2004, 162(2): 281-293.
[4] 康冰, 刘世荣, 张广军, 常建国, 温远光, 马姜明, 郝文芳. 广西大青山南亚热带马尾松、杉木混交林生态系统碳素积累和分配特征. 生态学报, 2006, 26(5): 1320-1329.
[5] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 2011, 333(6045): 988-993.
[6] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1/3): 317-333.
[7] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
[8] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, 2000, 24(5): 518-522.
[9] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13-16.
[10] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 2001, 43(9): 967-973.
[11] 贺金生. 中国森林生态系统的碳循环: 从储量、动态到模式. 中国科学: 生命科学, 2012, 42(3): 252-254.
[12] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, 2004, 40(6): 20-24.
[13] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 张池, 刘素萍, 张剑. 毛竹(*Phyllostachys pubescens*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生态系统碳贮量及其分配特征. 生态学报, 2007, 27(7): 2794-2801.
[14] 陈先刚, 张一平, 张小全, 郭颖. 过去 50 年中国竹林碳储量变化. 生态学报, 2008, 28(11): 5218-5227.
[15] 陈茂铨, 金晓春, 吴林森, 陈伟祥, 柴红玲. 竹林碳汇功能及其影响因子研究进展. 竹子研究汇刊, 2010, 29(3): 5-9.
[16] 王兵, 魏文俊, 邢兆凯, 李少宁, 白秀兰. 中国竹林生态系统的碳储量. 生态环境, 2008, 17(4): 1680-1684.
[17] 国家林业局. 中国森林资源报告——第七次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2009.
[18] 王兵, 王燕, 郭浩, 赵广东, 白秀兰. 江西大岗山毛竹林碳贮量及其分配特征. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 39-52.
[19] 刘应芳, 黄从德, 陈其兵. 蜀南竹海风景区毛竹林生态系统碳储量及其空间分配特征. 四川农业大学学报, 2010, 28(2): 136-140.
[20] 季宝海, 庄舜尧, 张厚喜, 孙波, 桂仁意. 我国毛竹林生态系统碳储量的地带性差异. 生态环境学报, 2013, 22(1): 1-5.
[21] 范叶青, 周国模, 施拥军, 董德进, 周宇峰. 坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响. 浙江农林大学学报, 2012, 29(3): 321-327.
[22] 周国模, 吴家森, 姜培坤. 不同管理模式对毛竹林碳贮量的影响. 北京林业大学学报, 2006, 28(6): 51-55.
[23] 漆良华, 刘广路, 范少辉, 岳祥华, 张华, 杜满义. 不同抚育措施对闽西毛竹林碳密度、碳贮量与碳格局的影响. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1482-1488.
[24] 庄舜尧, 季海宝, 张厚喜, 孙波, 桂仁意. 福建省建瓯市毛竹林生态系统固碳状态研究. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1200-1204.
[25] 张蕊, 申贵仓, 张旭东, 张雷, 高升华. 四川长宁毛竹林碳储量与碳汇能力估测. 生态学报, 2014, 34(13): 3592-3601.
[26] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 南亚热带杉木生态系统生物量和碳素积累及其空间分布特征. 林业科学, 2009, 45(8): 147-153.
[27] 程晓琴, 韩海荣, 康峰峰. 山西油松人工林生态系统生物量、碳积累及其分布. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2455-2460.
[28] 方晰, 田大伦, 项文化. 速生阶段杉木人工林碳素密度、贮量和分布. 林业科学, 2002, 38(3): 14-19.
[29] 郝云庆, 江洪, 向成华, 马元丹, 金静, 余树全. 天目山毛竹种群生物量结构. 四川林业科技, 2010, 31(4): 29-33.
[30] 彭在清, 林益明, 刘建斌, 邹秀红, 郭志坚, 郭启荣, 林鹏. 福建永春毛竹种群生物量和能量研究. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(5): 579-583.
[31] 何东进, 洪伟, 吴承祯, 蓝斌, 黄辉, 吴雄生. 武夷山毛竹天然林生物量与能量分配规律及其与人工林的比较研究. 西北植物学报, 2003, 23(2): 291-296.
[32] 王兵, 杨清培, 郭起荣, 赵广东, 方楷. 大岗山毛竹林与常绿阔叶林碳储量及分配格局. 广西植物, 2011, 31(3): 342-348.
[33] 范少辉, 刘广路, 苏文会, 杜满义, 吴继林. 闽西北不同类型毛竹林生物量分布格局. 安徽农业大学学报, 2011, 38(6): 842-847.
[34] 何亚平, 费世民, 蒋俊明, 陈秀明, 余英, 唐森强, 朱维双. 长宁毛竹和苦竹有机碳空间分布格局. 四川林业科技, 2007, 28(5): 10-14.
[35] 申贵仓, 张旭东, 张雷, 高升华, 张蕊, 朱维双, 唐森强. 蜀南苦竹林生态系统碳储量与碳汇能力估测. 林业科学, 2013, 49(3): 78-84.
[36] 王刚, 周本智, 李晓靖, 孔维健, 温从辉, 胡晓林. 吊丝单竹林生态系统碳储量及其垂直空间分配特征. 热带亚热带植物学报, 2012, 20(1): 72-77.
[37] 冯帅, 李贤伟, 黄从德, 赖元长, 张辟芳, 曹银. 四川洪雅退耕还林地麻竹生物量和碳储量. 四川农业大学学报, 2010, 28(3): 296-301.
[38] 沈迪玉, 黄从德, 张密, 陈其兵. 四川省纳溪区孝顺竹林生态系统碳储量及其空间分配格局. 四川林业科技, 2010, 31(2): 39-52.
[39] 刘正刚, 洪祖荣. 华西雨屏区退耕还林地杂交竹林碳储量特征研究. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10287-20288.